

4.3.3 Modelagem matemática do M_R em função do E_o e do estado de tensão considerando-se os solos desta e de outras pesquisas desenvolvidas na EESC-USP

Levando-se em consideração que a presente pesquisa contava apenas com três tipos de solos e visando dar uma maior abrangência ao estudo, conforme citado no item 4.3.2, foram incluídos nesta análise resultados de ensaios triaxiais cíclicos e de compressão simples de duas outras pesquisas desenvolvidas na Escola de Engenharia de São Carlos/USP: a dissertação de mestrado de CUNTO (1998) e a dissertação de mestrado de CARMO (1998).

Os três solos utilizados por CUNTO (1998) são predominantemente arenosos. A tabela 4.12 mostra a granulometria destes materiais e a tabela 4.13 apresenta as classificações, limites de consistência, massa específica seca máxima e umidade ótima destes solos, sendo que as massas específicas secas máximas e as umidades ótimas foram determinadas na energia normal de compactação.

Os solos da sub-base e base da rodovia CE-085 foram coletados no Estado do Ceará, entre as cidades de Caucaia e Barrento. O solo do Parnaíba foi coletado no município de Parnaíba, Estado do Piauí, onde é utilizado no recobrimento das estradas vicinais da região.

TABELA 4.12– Granulometria dos solos da pesquisa de CUNTO (1998)

Solo	Granulometria (%) (NBR – 6502)			
	Areia	Silte	Argila	% pass. #200
CE-085 (Sub-base)	82,1	4,7	13,2	21,0
CE-085 (Base)	88,6	3,8	7,6	15,0
Parnaíba-PI	56,4	19,1	24,5	48,0

TABELA 4.13– Características e classificação dos três solos da pesquisa de CUNTO (1998)

Solo			
	CE-085 (Sub-base)	CE-085 (Base)	Parnaíba-PI
HRB	A-2-4	A-2-4	A-3
USCS	SC	SC	CL
MCT	LA'	LA	LG'
LL (%)	20,2	NL	26,2
IP (%)	6,7	-	7,9
Energia de compactação	Normal	Normal.	Normal
$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	2,043	1,968	1,912
W _{ot} (%)	10,07	9,76	14,00

Os dois solos utilizados por CARMO (1998) são um areno-argiloso utilizado na construção das camadas de reforço e base da rodovia SCA-040, em São Paulo, e outro argiloso, proveniente da região de Uberaba.

A tabela 4.14 mostra a granulometria destes materiais e a tabela 4.15 apresenta as classificações, limites de consistência, massa específica seca máxima e umidade ótima destes dois solos, sendo que as massas específicas secas máximas e as umidades ótimas foram determinadas na energia normal e intermediária de compactação e a tabela 4.15 mostra a granulometria destes materiais.

TABELA 4.14– Granulometria dos solos da pesquisa de CARMO (1998)

Solo	Granulometria (%) (NBR – 6502)			
	Areia	Silte	Argila	% pass. #200
SCA-040 (SP)	77,0	3,0	19,97	29,25
Uberaba (MG)	19,0	32,0	48,0	88,44

TABELA 4.15– Características e classificação dos solos da pesquisa de CARMO (1998)

	Solo			
	SCA-040 (SP)		Uberaba (MG)	
HRB	A-2-4		A-7-5	
USCS	SC		CL	
MCT	LA'		LG'	
LL (%)	27,60		48,40	
IP (%)	9,24		14,74	
Energia de compactação	Normal	Interm.	Normal.	Interm.
$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	1,960	2,015	1,550	1,700
W_{ot} (%)	11,30	10,10	27,00	25,00

A tabela 4.16 apresenta o conjunto dos valores do módulo tangente inicial obtidos a partir dos ensaios de compressão simples realizados nas pesquisas de CARMO (1998) e CUNTO (1998).

TABELA 4.16 – Módulo tangente inicial dos materiais utilizados nas pesquisas de CUNTO (1998) e CARMO (1998)

Solo	Classificação	Energia de Compactação	E_o (MPa)
CE-085 (sub-base)	LA'	Normal	24
CE-085 (base)	LA'	Normal	28
Parnaíba	LG'	Normal	55
SCA-040 (SP)	LA'	Normal	402
		Intermediária	1560
Uberaba (MG)	LG'	Normal	123
		Intermediária	446

Enfatiza-se que todas as análises apresentadas a seguir foram realizadas tomando como base o módulo de resiliência determinado a partir dos parâmetros do modelo composto, expresso pela equação 4.5, pois como constatado no item 4.3.2 este modo de análise proporciona maiores coeficientes de determinação. A tabela 4.17

apresenta os parâmetros de regressão obtidos do modelo da equação 4.5 aplicado aos solos de CUNTO (1998) e CARMO (1998).

TABELA 4.17–Parâmetros de regressão do modelo da equação 4.5 aplicado aos solos de CUNTO (1998) e CARMO (1998)

Solos	En. Compactação	Par. Regressão
CUNTO (1998)		
CE – 085 (Sub-base)	Normal	$k_1 = 234$
		$k_2 = -0,18$
		$k_3 = -0,04$
CE – 085 (Base)	Normal	$k_1 = 911$
		$k_2 = 0,09$
		$k_3 = 0,47$
Parnaíba (PI)	Normal	$k_1 = 600$
		$k_2 = -0,10$
		$k_3 = 0,47$
CARMO (1998)		
SCA – 040 (SP)	Normal	$k_1 = 810$
		$k_2 = 0,01$
		$k_3 = 0,14$
	Intermediária	$k_1 = 1284$
		$k_2 = 0,11$
		$k_3 = 0,10$
Uberaba (MG)	Normal	$k_1 = 118$
		$k_2 = -0,53$
		$k_3 = 0,98$
	Intermediária	$k_1 = 752$
		$k_2 = -0,19$
		$k_3 = 0,11$

A tabela 4.18 apresenta as expressões matemáticas analisadas e os coeficientes de determinação (R^2) correspondentes para o conjunto dos oito solos considerados nesta etapa da pesquisa. Foram utilizadas um total de 472 observações.

TABELA 4.18– Expressões matemáticas analisadas para representar a variação do módulo de resiliência em função do módulo tangente inicial e estado de tensão englobando solos desta e de outras pesquisas

Solos desta e de outras pesquisas		
Função	Expressões	R ²
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \sigma_3)$	$M_R = 42,06 \cdot E_o^{0,38} + 0,30 \cdot \sigma_d^{-1,93} + 971,35 \cdot \sigma_3^{0,75}$	0,65
$M_R = f(E_o; \sigma_d)$	$M_R = 116,09 \cdot E_o^{0,26} + 0,05 \cdot \sigma_d^{-2,41}$	0,62
$M_R = f(E_o; \sigma_3)$	$M_R = 78,53 \cdot E_o^{0,31} + 438,66 \cdot \sigma_3^{0,50}$	0,48
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \sigma_3)$	$M_R = 57,45 \cdot E_o^{0,34} + 185,05 \cdot (\sigma_3 / \sigma_d)^{0,81}$	0,63
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \theta)$	$M_R = 43,38 \cdot E_o^{0,37} + 61,05 \cdot (\theta / \sigma_d)^{0,90}$	0,64
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \sigma_3)$	$M_R = 142,62 \cdot E_o^{0,25} \cdot \sigma_d^{-0,29} \cdot \sigma_3^{0,27}$	0,63
$M_R = f(E_o; \sigma_1; \sigma_3)$	$M_R = 225,75 \cdot E_o^{0,25} \cdot \sigma_1^{-0,51} \cdot \sigma_3^{0,51}$	0,60
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \theta)$	$M_R = 84,91 \cdot E_o^{0,25} \cdot \sigma_d^{-0,39} \cdot \theta^{0,38}$	0,64
$M_R = f(E_o; \sigma_3)$	$M_R = 196,92 \cdot E_o^{0,24} \cdot \sigma_3^{0,11}$	0,48
$M_R = f(E_o; \theta)$	$M_R = 132,70 \cdot E_o^{0,24} \cdot \theta^{-0,06}$	0,47
$M_R = f(E_o; \sigma_1; \sigma_3)$	$M_R = 107,25 \cdot E_o^{0,27} + 2,69 \cdot \sigma_1^{-1,52} + 8,01 \cdot \sigma_3^{4,02}$	0,50
$M_R = f(E_o; \sigma_1; \sigma_3)$	$M_R = 96,75 \cdot E_o^{0,28} + 1060,70 \cdot (\sigma_3 / \sigma_1)^{3,33}$	0,63
$M_R = f(E_o; \sigma_1; \theta)$	$M_R = 84,77 \cdot E_o^{0,30} + 3,13 \cdot (\theta / \sigma_1)^{5,35}$	0,63

Analisando-se os resultados apresentados na tabela 4.18 e tomando-se os valores dos coeficientes de determinação (R²) como uma medida comparativa do desempenho dos diversos modelos, conclui-se que o modelo da equação 4.21 (R² = 0,65) é o que melhor descreve a relação entre o módulo de resiliência, o módulo tangente inicial e o estado de tensão, apesar de outros oito deles apresentarem coeficientes de determinação (R²) muito próximos (0,60 a 0,64).

$$M_R = 42,06 \cdot E_o^{0,38} + 0,30 \cdot \sigma_d^{-1,93} + 971,35 \cdot \sigma_3^{0,75} \quad (4.21)$$

onde:

M_R - módulo de resiliência em MPa;

σ_d - tensão desvio em MPa;

σ_3 – tensão de confinamento em MPa;

E_o – módulo tangente inicial em MPa.

A figura 4.27 apresenta os valores do módulo de resiliência determinados a partir de parâmetros do modelo composto (eq. 4.5) e os valores deste mesmo módulo determinados utilizando a equação 4.21.

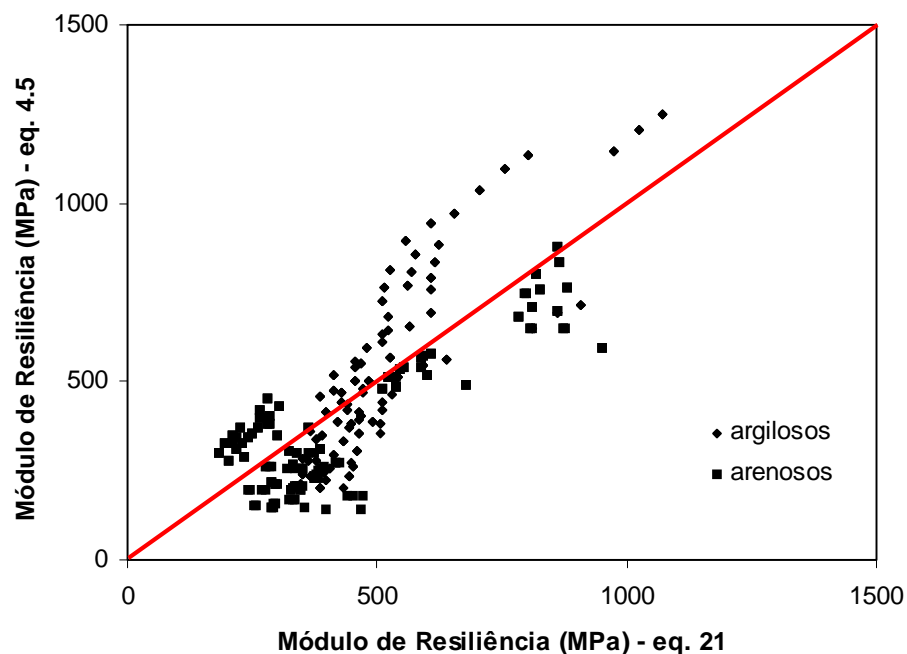


FIGURA 4.27 – Módulo de resiliência: valores determinados através dos parâmetros do modelo composto versus os valores determinados pela equação 4.21.

Conforme apresentado na Revisão Bibliográfica, solos argilosos e arenosos, sofrem a influência, quase que exclusiva, da tensão desvio e confinante, respectivamente. Esta constatação enseja que relações entre o módulo de resiliência e o módulo tangente inicial correspondentes a solos predominantemente argilosos ou arenosos não devam ser únicas.

Com o propósito de analisar a consequência de se considerar solos puramente argilosos ou arenosos separadamente, foram estudadas relações envolvendo solos predominantemente argilosos e em seguida, os predominantemente arenosos.

A tabela 4.19 apresenta as expressões matemáticas e os correspondentes coeficientes de determinação obtidos segundo a nova condição de análise, tomando-se os solos predominantemente argilosos. O número de observações consideradas é igual a 256 e foram considerados os solos argiloso, areno-argiloso e Uberaba (MG).

TABELA 4.19– Expressões matemáticas analisadas para representar a variação do módulo de resiliência em função do módulo tangente inicial e estado de tensão englobando os solos de predominância argilosa desta e de outras pesquisas.

Solos argilosos desta e de outras pesquisas		
Função	Expressões	R ²
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \sigma_3)$	$M_R = 0,95 \cdot E_o^{1,08} + 25,60 \cdot \sigma_d^{-0,79} + 1339,21 \cdot \sigma_3^{1,69}$	0,97
$M_R = f(E_o; \sigma_d)$	$M_R = 1,20 \cdot E_o^{1,04} + 26,31 \cdot \sigma_d^{-0,78}$	0,97
$M_R = f(E_o; \sigma_3)$	$M_R = 14,86 \cdot E_o^{0,68} - 5,21 \cdot \sigma_3^{-0,57}$	0,74
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \sigma_3)$	$M_R = 1,15 \cdot E_o^{1,05} + 228,97 \cdot (\sigma_3/\sigma_d)^{0,55}$	0,93
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \theta)$	$M_R = 0,78 \cdot E_o^{1,11} + 99,75 \cdot (\theta/\sigma_d)^{0,63}$	0,92
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \sigma_3)$	$M_R = 12,30 \cdot E_o^{0,62} \cdot \sigma_d^{-0,28} \cdot \sigma_3^{0,08}$	0,96
$M_R = f(E_o; \sigma_1; \sigma_3)$	$M_R = 19,65 \cdot E_o^{0,63} \cdot \sigma_1^{-0,59} \cdot \sigma_3^{0,41}$	0,95
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \theta)$	$M_R = 10,54 \cdot E_o^{0,62} \cdot \sigma_d^{-0,30} \cdot \theta^{0,09}$	0,96
$M_R = f(E_o; \sigma_3)$	$M_R = 14,33 \cdot E_o^{0,71} \cdot \sigma_3^{0,52}$	0,74
$M_R = f(E_o; \theta)$	$M_R = 9,64 \cdot E_o^{0,72} \cdot \theta^{-0,15}$	0,76
$M_R = f(E_o; \sigma_1; \sigma_3)$	$M_R = 104,44 \cdot E_o^{0,42} - 1004,21 \cdot \sigma_1^{0,49} + 347,83 \cdot \sigma_3^{184,24}$	0,84
$M_R = f(E_o; \sigma_1; \sigma_3)$	$M_R = 3,78 \cdot E_o^{0,87} + 666,39 \cdot (\sigma_3/\sigma_1)^{2,01}$	0,93
$M_R = f(E_o; \sigma_1; \theta)$	$M_R = 2,61 \cdot E_o^{0,92} + 18,24 \cdot (\theta/\sigma_1)^{3,36}$	0,93

Analisando-se os resultados apresentados na tabela 4.19, concluí-se que o modelo da equação 4.22 ($R^2 = 0,97$) e os modelos expressos em função da tensão

desvio combinada com a tensão confinante apresentam idênticos e maiores valores de coeficiente de determinação.

$$M_R = 1,20 \cdot E_o^{1,04} + 26,31 \cdot \sigma_d^{-0,78} \quad (4.22)$$

onde:

M_R - módulo de resiliência em MPa;

σ_d - tensão desvio em MPa;

E_o – módulo tangente inicial em MPa.

Na figura 4.28 encontram-se os valores do M_R determinados a partir dos parâmetros do modelo composto (eq. 4.5) e os valores previstos pela equação 4.22.

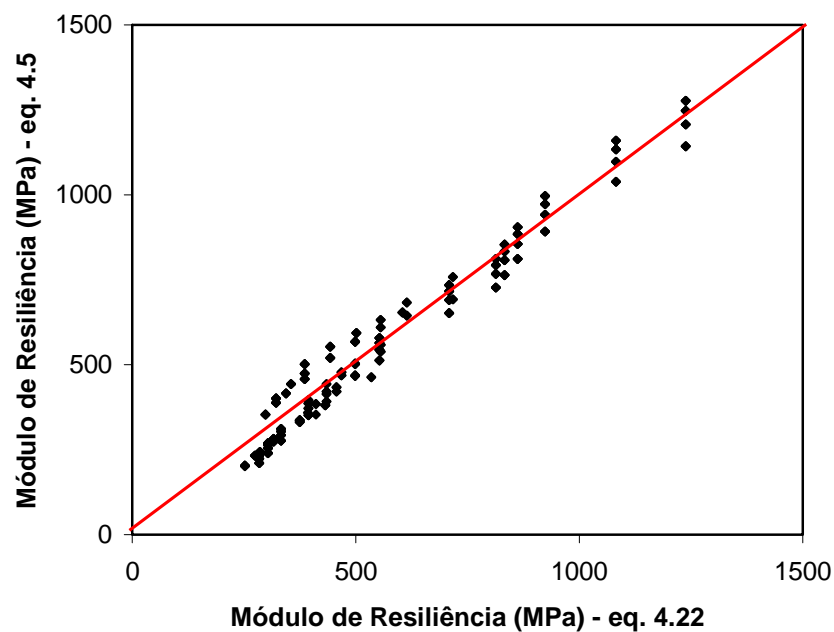


FIGURA 4.28 – Módulo de resiliência: valores determinados através dos parâmetros do modelo composto versus os valores determinados pela equação 4.22.

Comparando-se a análise conjunta de todos os solos e a análise considerando-se apenas os predominantemente argilosos, observa-se que esta última

conduziu a modelos com coeficientes de determinação R^2 mais elevados que a análise primitiva, confirmando a observação realizada anteriormente para os solos desta pesquisa.

A tabela 4.20 mostra as expressões matemáticas e os correspondentes coeficientes de determinação obtidos considerando-se conjuntamente os solos de predominância arenosa desta e das outras pesquisas. O número de observação nesta condição foi de 216. Foram considerados nesta análise os solos arenoso, CE-085 (Sub-base), CE-085 (Base), Parnaíba-PI e SCA-040 (SP).

TABELA 4.20– Expressões matemáticas analisadas para representar a variação do módulo de resiliência em função do módulo tangente inicial e estado de tensão englobando solos de predominância arenosa desta e de outras pesquisa

Solos arenosos desta e de outras pesquisas		
Função	Expressões	R^2
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \sigma_3)$	$M_R = 2,91 \cdot E_o^{0,69} - 663,89 \cdot \sigma_d^{48,32} + 667,04 \cdot \sigma_3^{0,32}$	0,82
$M_R = f(E_o; \sigma_d)$	$M_R = 3,06 \cdot E_o^{0,68} + 454,76 \cdot \sigma_d^{0,22}$	0,81
$M_R = f(E_o; \sigma_3)$	$M_R = 2,91 \cdot E_o^{0,69} + 677,04 \cdot \sigma_3^{0,32}$	0,82
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \sigma_3)$	$M_R = 3,04 \cdot E_o^{0,68} + 270,17 \cdot (\sigma_3/\sigma_d)^{-0,05}$	0,77
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \theta)$	$M_R = 3,04 \cdot E_o^{0,68} + 300,73 \cdot (\theta/\sigma_d)^{-0,07}$	0,78
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \sigma_3)$	$M_R = 305,03 \cdot E_o^{0,19} \cdot \sigma_d^{0,10} \cdot \sigma_3^{0,13}$	0,73
$M_R = f(E_o; \sigma_1; \sigma_3)$	$M_R = 271,15 \cdot E_o^{0,19} \cdot \sigma_1^{0,16} \cdot \sigma_3^{0,06}$	0,73
$M_R = f(E_o; \sigma_d; \theta)$	$M_R = 231,16 \cdot E_o^{0,19} \cdot \sigma_d^{0,03} \cdot \theta^{0,20}$	0,73
$M_R = f(E_o; \sigma_3)$	$M_R = 303,84 \cdot E_o^{0,19} \cdot \sigma_3^{0,22}$	0,72
$M_R = f(E_o; \theta)$	$M_R = 224,36 \cdot E_o^{0,19} \cdot \theta^{0,02}$	0,73
$M_R = f(E_o; \sigma_1; \sigma_3)$	$M_R = 2,90 \cdot E_o^{0,69} - 126,37 \cdot \sigma_1^{166,99} + 677,04 \cdot \sigma_3^{0,32}$	0,82
$M_R = f(E_o; \sigma_1; \sigma_3)$	$M_R = 3,05 \cdot E_o^{0,68} + 253,33 \cdot (\sigma_3/\sigma_1)^{-0,09}$	0,77
$M_R = f(E_o; \sigma_1; \theta)$	$M_R = 3,04 \cdot E_o^{0,68} + 310,09 \cdot (\theta/\sigma_1)^{-0,20}$	0,78

Analisando-se os resultados apresentados na tabela 4.20, concluí-se que o modelo da equação 4.23 ($R^2 = 0,82$) e os modelos expressos em função da tensão confinante combinada com a tensão desvio e da tensão confinante combinada com a tensão principal maior apresentam idênticos e maiores valores de coeficiente de determinação.

$$M_R = 2,91 \cdot E_0^{0,69} + 677,04 \cdot \sigma_3^{0,32} \quad (4.23)$$

onde:

M_R - módulo de resiliência em MPa;

σ_3 - tensão de confinamento em MPa;

E_0 - módulo tangente inicial em MPa.

A figura 4.29 apresenta os valores do módulo de resiliência determinados a partir dos parâmetros do modelo composto (eq. 4.5) e os valores deste mesmo módulo determinado utilizando a equação 4.23.

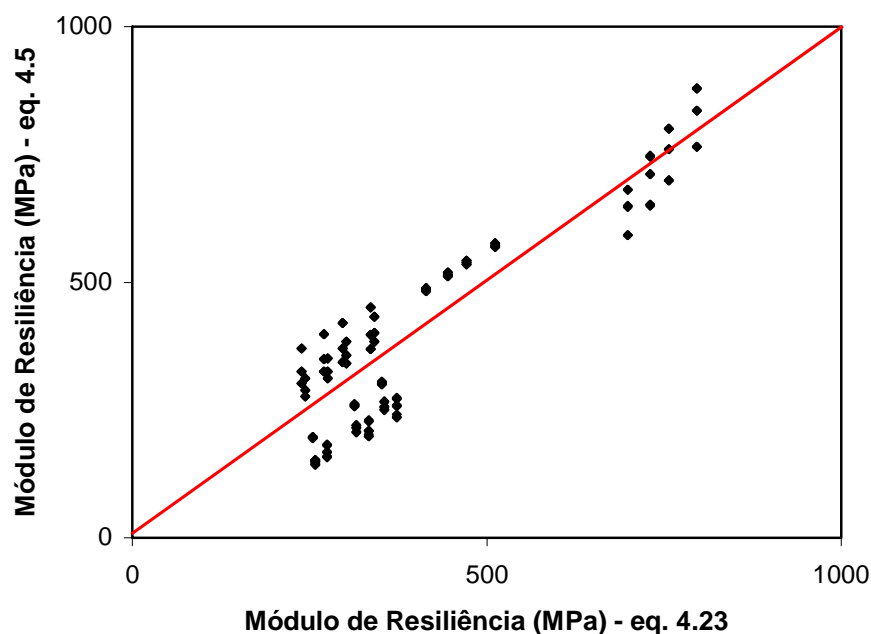


FIGURA 4.29 – Módulo de resiliência: valores determinados através dos parâmetros do modelo composto versus os valores determinados pela equação 4.23.

Analisando-se as três últimas equações desenvolvidas neste item, 4.21, 4.22 e 4.23, pode-se concluir que quando foram usados os oito solos o coeficiente de determinação foi de 0,65, ao passo que, quando foram separados estes materiais em solos de predominância argilosa e de predominância arenosa, influenciados pela tensão desvio e pela tensão de confinamento, nesta ordem, os coeficientes de determinação sofreram significativo acréscimo. Este fato indica que o procedimento de separar-se os solos em duas categorias, segundo a suas frações granulométricas predominante, é adequado para análises deste gênero. Finalmente, os valores elevados de R^2 alcançados são indicativos da viabilidade de relações que possibilitem a estimativa do módulo de resiliência a partir do E_0 obtido em ensaios de compressão simples.